

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Synchronizovaný asynchronní stroj
Synchronized induction machine

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání bakalářské práce

Student: **Michal Kotulla**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika
Téma: Synchronizovaný asynchronní stroj
Synchronized Induction Machine

Zásady pro vypracování:

- 1) Teoretický rozbor synchronizovaného asynchronního stroje
- 2) Měření na synchronizovaném asynchronním stroji
- 3) Vyhodnocení měření
- 4) Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- 1) Petrov, G.N.-Elektrické stroje 2, Academia 1982
- 2) Krause, P.; Wasynczuk, O.- Analysis of Electric Machinery and Drive Systems, IEEE Press 2002
- 3) Boldea, I.; Nasar, S.A.-The Induction Machine Handbook, CRC Press 2001
- 4) Hrabovcová, V. a kol.- Meranie a modelovanie elektrických strojov, Žilina

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Václav Čech, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Michal Kotulla

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 28. dubna 2016

Kotulla
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Václavu Čechovi, Ph.D., Ing. Stanislavu Rusnokovi, Pavlovy Sobotovi za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce.

Abstrakt

Tato práce je zaměřena na způsob synchronizování asynchronního motoru, jeho rozbor a vyhodnocení vlastností stroje. Pro pochopení problematiky, je nejdříve obecně rozebrán asynchronní motor (tím se rozumí například konstrukce, princip činnosti, jeho využití v praxi). V další části je uvedeno řešení problematiky, tj. postup pro synchronizaci asynchronního motoru. Po tomto rozebrání tematiky se zde nachází měření na asynchronním motoru jak v asynchronním chodu, tak i v synchronním chodu. To zahrnuje jejich postup, naměřené hodnoty a grafická vyhodnocení. Poslední část je vyhrazena pro vyhodnocení měření, uvedení základních vlastností motoru, jeho hlavní výhody a rozdíl oproti klasickým asynchronním motorům.

Klíčová slova

Asynchronní motor; princip činnosti; energetická bilance; náhradní schéma; synchronizace; synchronní otáčky; skluz; napětí; proud; moment; účinník; měření naprázdno; měření nakrátko; momentová charakteristika; zatěžovací charakteristika; V- křivky;

Abstract

This thesis focuses on the way induction motors synchronize, their analysis and an evaluation of their features. For the sake of understanding the topic, induction motor is at first described in terms of its construction, principles of operation and its practical usage. The next part provides the steps in the process of induction motor synchronizing. Then an induction motor is measured during both asynchronous and synchronous operation. It involves a description of the procedure, measured values and graphic representation of the results. The final part is concerned with the measurement evaluation, presentation of basic features of the motor, its main advantages and its comparison with respect to usual induction motors.

Key words

Induction motor; principle of operation; energy balance; substitution diagram; synchronization; synchronous speed; slip; voltage; current; torque; power factor; open-circuit measurement; short-circuit measurement; speed-torque characteristic; load characteristic

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Název symbolu
$\cos\varphi$	-	Účinník
g	-	Redukční činitel
I	A	Proud
i	-	Poměrný proud
M	Nm	Moment
n_s	min ⁻¹	Synchronní otáčky
P	W	Mechanický výkon
P'	W	Celkový mechanický výkon
P_1	W	Příkon
R	Ω	Odpor
s	-	Skluz
U	V	Napětí
X_μ	Ω	Magnetická reaktance
X_d	Ω	Synchronní reaktance
X_σ	Ω	Rozptylová reaktance
Z_N	Ω	Jmenovitá impedance
ΔP_{Cu}	W	Výkonové ztráty ve vinutí
ΔP_d	W	Přídavné výkonové ztráty
ΔP_{Fe}	W	Výkonové ztráty v železe
ΔP_m	W	Výkonové mechanické ztráty
ΔP_δ	W	Výkon přenesený vzduchovou mezerou
η	-	Účinnost

Obsah

1	Úvod	1
2	Význam a využití asynchronních strojů	2
3	Základní údaje asynchronního motoru	2
4	Konstrukce asynchronního motoru	3
4.1	Stator	4
4.2	Rotor.....	4
4.3	Svorkovnice.....	5
5	Princip	5
6	Energetická bilance	7
7	Synchronizace asynchronního motoru	9
8	Měření odporu	10
9	Měření v asynchronním chodu	11
9.1	Měření naprázdno.....	11
9.2	Měření nakrátko	14
9.3	Měření zatěžovací charakteristiky	15
9.4	Měření momentové charakteristiky	18
10	Měření v synchronizovaném chodu	19
10.1	Měření naprázdno.....	19
10.2	Měření nakrátko	21
10.3	Měření V - křivek	24
11	Výpočet náhradního schématu	25
12	Vyhodnocení měření	27
12.1	Měření asynchronního motoru	27
12.2	Měření synchronizovaného asynchronního motoru	28
12.3	Náhradní schéma asynchronního motoru	28
13	Závěr	29

Seznam ilustrací

Obr. 1 Štítek asynchronního kroužkového motoru.....	3
Obr. 2 Řez asynchronního motoru.....	3
Obr. 3 Statorový svazek	4
Obr. 4 Rotor nakrátko asynchronního motoru.....	4
Obr. 5 Rotorové vinutí připojené na odporníky	5
Obr. 6 Způsoby zapojení svorkovnice.....	5
Obr. 7 Vektorový diagram magnetomotorického napětí dvoupólového asynchronního motoru	6
Obr. 8 Rozdělení výkonů asynchronního motoru.....	8
Obr. 9 Zapojení rotorového vinutí.....	9
Obr. 10 Zapojení odporu rotorového vinutí	9
Obr. 11 odpory vinutí zapojené do hvězdy	10
obr. 12 Schéma měření asynchronního motoru naprázdno	11
Obr. 13 Charakteristika měření naprázdno.....	13
Obr. 14 Charakteristika ztrát naprázdno.....	13
Obr. 15 Schéma měření asynchronního motoru nakrátko	14
Obr. 16 Charakteristika měření nakrátko	15
Obr. 17 Schéma měření zatěžovacích charakteristik asynchronního motoru.....	15
Obr. 18 Závislost skluzu a proudu na mechanickém výkonu.....	17
Obr. 19 Zatěžovací charakteristika.....	17
Obr. 20 Schéma zapojení asynchronního motoru.....	18
Obr. 21 Momentová charakteristika	19
Obr. 22 Schéma zapojení měření naprázdno v synchronním chodu	20
Obr. 23 Charakteristika naprázdno synchronního chodu	20
Obr. 24 Charakteristika naprázdno generátoru.....	21
Obr. 25 Schéma zapojení pro měření souměrného zkratu pomocí měřících transformátorů ...	21
Obr. 26 Zapojení dvoupólového zkratu.....	22
Obr. 27 Charakteristika měření nakrátko pro souměrný zkrat	22
Obr. 28 Charakteristika měření nakrátko pro dvoupólový zkrat	23
Obr. 29 V - křivky generátoru	24
Obr. 30 V - křivky motoru.....	25

Obr. 31 Náhradní schéma asynchronního motoru	26
--	----

Seznam tabulek

Tab. 1 Naměřené hodnoty odporu vinutí statoru a rotoru	11
Tab. 2 Výtažek změřených hodnot při měření naprázdno	12
Tab. 3 Výtažek hodnot z měření nakrátko	14
Tab. 4 Naměřené hodnoty zatěžovací charakteristiky	16
Tab. 5 Jmenovité hodnoty měřeného motoru	16
Tab. 6 Naměřené hodnoty momentové charakteristiky	18
Tab. 7 Výtažek hodnot měření naprázdno	20
Tab. 8 Hodnoty pro souměrný zkrat	21
Tab. 9 Hodnoty nesouměrného zkratu	22
Tab. 10 Naměřené hodnoty pro motor	24
Tab. 11 Naměřené hodnoty pro generátor	24
Tab. 12 Jmenovité hodnoty měření naprázdno	27
Tab. 13 Jmenovité hodnoty nakrátko	27
Tab. 14 Parametry synchronního stroje	28
Tab. 15 Parametry náhradního schématu	28

1 Úvod

Mezi asynchronní stroje neodmyslitelně patří asynchronní motor, který už dlouho dobu patří k nejvíce vyráběným asynchronním strojům. Mohou za to jeho výhody a velmi dobré využití praxi, více informací je uvedeno v nadcházející kapitole, která je na toto téma zaměřena. Základními konstrukčními prvky asynchronního motoru jsou stator a rotor (pohyblivá část), ve kterých se nachází vícefázová vinutí (kapitola č. 4). Vznik otáčení rotoru a další charakteristické vlastnosti jsou probrané v principu činnosti asynchronního motoru. Průchodem elektrické energie statorem a rotorem vznikají ztráty, které ovlivňují výsledný mechanický výkon. Znázornění těchto ztrát je stručně popsáno v energetické bilanci. Asynchronní motor lze po určité úpravě provozovat jako synchronní motor. Popis a odvození této úpravy je probrán v kapitole č. 7. Mezi základní zkoušky asynchronního motoru patří měření naprázdno, nakrátko, měření zatěžovací a momentové charakteristiky. Pomocí těchto zkoušek se zjišťují vlastnosti asynchronního motoru (kapitola č. 9). Po synchronizaci asynchronního motoru lze provést zkoušky, které se dělají u synchronních motorů, a to měření naprázdno, nakrátko a V - křivky. Po dokončení měření a získání příslušných hodnot se provádí výpočet náhradního schématu. Díky němu jsme schopni určit závislosti mezi veličinami. Vyhodnocení měření slouží určení základních veličin, které charakterizují zkoušený motor.

2 Význam a využití asynchronních strojů

Asynchronní stroje se v průmyslu využívají více než 100 let. Nejrozšířenějším elektrickým strojem je asynchronní motor. Jako každý jiný elektrický stroj i asynchronní motor dokáže měnit elektrickou energii na mechanickou či naopak. Je nejčastěji používán pro svou jednoduchost, dobrou provozní spolehlivost, nenáročnost na údržbu a pro nízkou pořizovací cenu. K rozšíření asynchronního motoru přispěly i všeobecně používané třífázové sítě, které rozvádí elektrickou energii. Rozsah vyráběných asynchronních motorů je velký, začíná u několika wattů a končí u desítek MW. [1]

Odtud proudí i jeho využití jako pohon pro nejrůznější zařízení a v této době i taková, která vyžadují regulaci otáček, což jsou čerpadla, kompresory, výtahy, obráběcí stroje, jeřáby, pračky, apod.. [1]

Aplikace asynchronních strojů jako pohony pro elektrické lokomotivy jen zdůrazňuje jejich použitelnost. V regulovaných pohonech asynchronní motory postupně převládají nad stejnosměrnými motory. V menším množství se používají například asynchronní generátory pro malé vodní elektrárny, větrné elektrárny, apod.. [1]

Asynchronní motor je, jako každý stroj, vratný, tudíž může pracovat jako motor nebo generátor. Přechod z jednoho stavu do druhého probíhá plynule. Jako příklad můžeme vzít pohon jeřábu, kde při zvedání závaží stroj pracuje jako motor, ale při spouštění pracuje stroj jako generátor. [1]

3 Základní údaje asynchronního motoru

Základní údaje o asynchronním motoru, které jsou důležité jak pro výrobce, tak i pro uživatele motoru, jsou k nalezení na výkonostním štítku motoru. Štítek je nedílnou součástí stroje, tudíž by měl být vyroben tak, aby jeho údaje zůstaly čitelné po celé době jeho životnosti. [3]

Údaje na štítku o asynchronním motoru jsou následující:

- druh proudu - jednofázový nebo trojfázový
- jmenovitý výkon stroje (kW)
- jmenovité satorové napětí (V)
- jmenovitý satorový proud (A)
- jmenovitý kmitočet (Hz)
- jmenovité otáčky (min^{-1})
- jmenovitý účinník
- spojení satorového vinutí (Y, D)
- druh zatížení - např. přerušovaný chod, krátkodobý chod - uvádí se značkou (S3, S2)
- tvar stroje IM
- stupeň krytí IP
- druh chlazení IC
- třída izolace vinutí

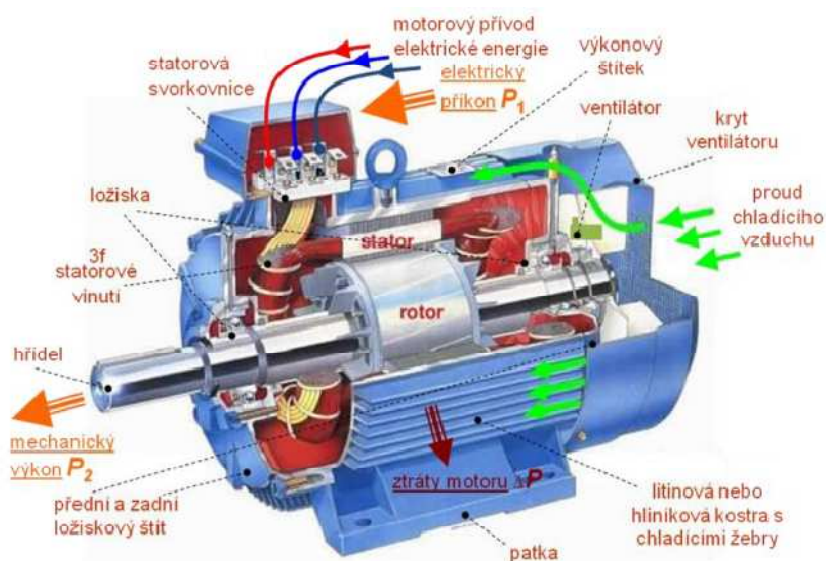
Na štítku je dále uveden název výrobce, jeho sídlo, rok výroby, typ, hmotnost a výrobní číslo. V blízkosti hřídele se obvykle uvádí směr otáčení motoru, který udává, je-li motor určen pouze pro jeden směr otáčení a jestli lze provést změnu otáčení po konstrukční úpravě. [3]



Obr. 1 Štítek asynchronního kroužkového motoru

4 Konstrukce asynchronního motoru

Pro získání základního přehledu o jednotlivých částech asynchronního motoru je na obr. 2 zobrazen pohled na řez trojfázovým asynchronním motorem v patkovém provedení.



Obr. 2 Řez asynchronního motoru [2]

4.1 Stator

Stator tvoří svazek vytvořený z plechů pro elektrotechniku ET. Na vnitřním obvodu svazku jsou drážky, v nichž je uloženo trojfázové vinutí. [3]

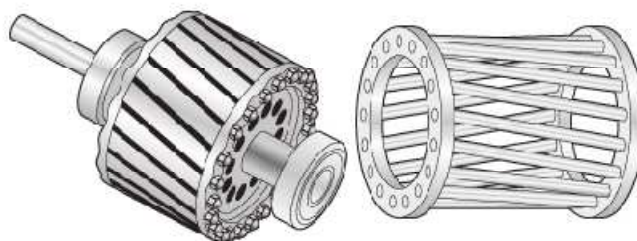


Obr. 3 Statorový svazek

4.2 Rotor

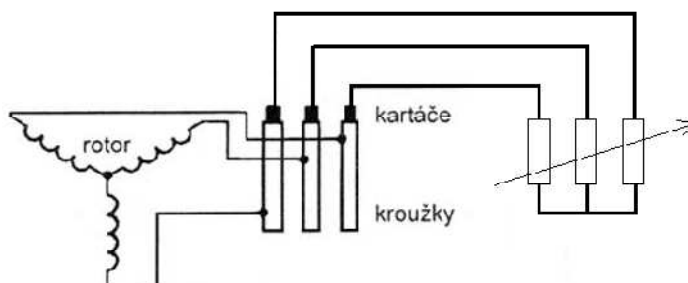
Rotor asynchronního motoru dělíme podle provedení rotorového (kotevního) vinutí na motory s kotvou nakrátko a s kotvou kroužkovou. [3]

Motory s kotvou nakrátko mají vinutí vyrobeno z tyčí uložených v drážkách. Vinutí rotoru je po obou stranách spojené nakrátko. [3]



Obr. 4 Rotor nakrátko asynchronního motoru

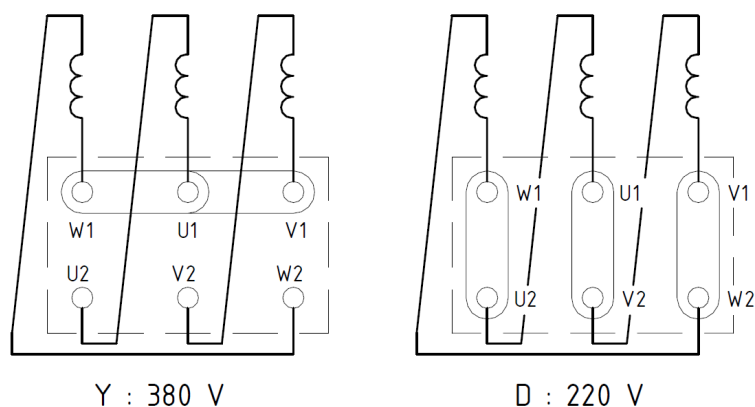
Kotva kroužková má rotorové vinutí téměř totožné, jako statorové vinutí uložené v drážkách. Jeho konce bývají zapojené do uzlu (zapojení do hvězdy) a jsou napojeny ke kroužkům. Na kroužcích kloužou kartáče, které jsou na nich trvale nebo pouze při rozběhu motoru přiloženy. Ke kartáčům se mohou připojit zařízení pro úpravu vlastností motoru. [2]



Obr. 5 Rotorové vinutí připojené na odporníky [2]

4.3 Svorkovnice

Začátky a konce fází statorového vinutí jsou napojeny ke svorkovnici. Vinutí může být zapojeno dvojím způsobem, a to buď do trojúhelníku, nebo do hvězdy. Jednotlivá zapojení jsou znázorněny na obr. 6. [3]



Obr. 6 Způsoby zapojení svorkovnice [3]

5 Princip

Stator asynchronního motoru není elektricky spojen s rotorem. Do rotoru se výkon předává elektromagnetickou indukcí, proto je často používán výraz indukční stroj. Asynchronní motor pracuje na principu vzájemného elektromagnetického působení točivého magnetického pole statoru a proudů vyvolaných ve vinutí rotoru tímto polem. Aby magnetická vazba byla co nejlepší, pak musí být vzduchová mezera mezi státorem a rotorem co nejmenší. [3]

U asynchronního motoru se vyskytuje mezi vstupním a výstupním vynutím stejná magnetická vazba jako u transformátoru. Avšak u asynchronního motoru se výstupní vinutí (rotorové vinutí) otáčí. Aby se v rotorovém vinutí indukovala elektromotorická síla a protékal jím proud, musí se vyskytovat relativní pohyb rotoru v závislosti na točivém poli statoru, tudíž otáčky zatíženého motoru jsou menší v porovnání se synchronními otáčkami točivého pole, tedy asynchronní. Pokud by otáčky rotoru byly stejné jako magnetické pole ve vzduchové mezeře (tj. synchronní otáčky), nevznikl by relativní pohyb mezi rotorem a magnetickým polem a v rotorovém vinutí by se neindukovala elektromotorická síla a neprotékal jím proud. [3]

Pokles otáček se obvykle udává jako skluz. Udává se většinou v procentech a u malých motorů může dosahovat hodnoty až 10 %, zato u velkých motorů dosahuje hodnota i pod 1 %. [3]

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (1)$$

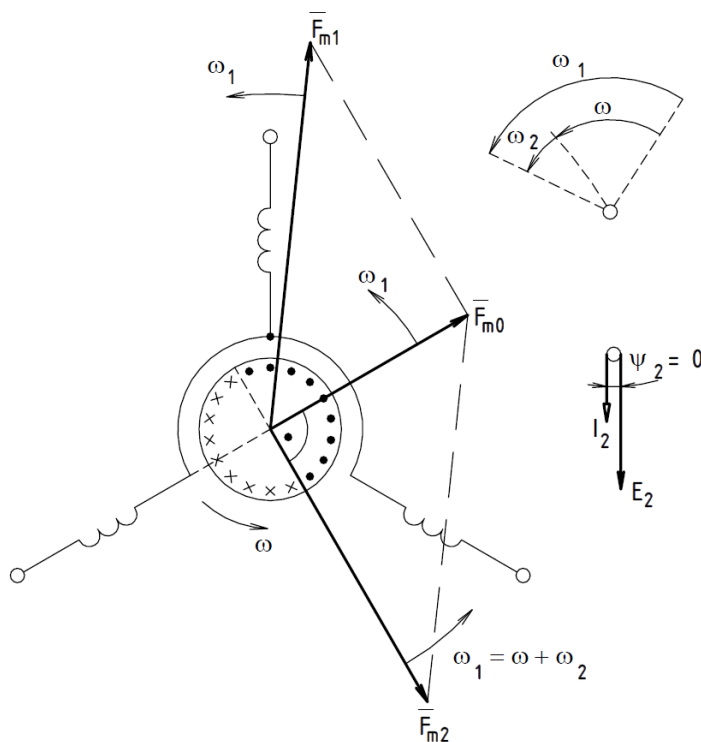
kde $n_s = \frac{60 \cdot f}{p}$ jsou synchronní otáčky točivého magnetického pole statoru [min^{-1}]

n otáčky rotoru

p počet pólových dvojic stroje

f statorová frekvence

Uvažujme, že stator dvoupólového asynchronního motoru má třífázové vinutí a rotor obsahuje mnohofázové klecové vinutí - obr. 7.



Obr. 7 Vektorový diagram magnetomotorického napětí dvoupólového asynchronního motoru [3]

Průchodem proudu I_1 statorovým vinutím, se vytvoří magnetomotorické napětí, to si představíme jako vektor F_{m1} , který se v prostoru otáčí úhlovou rychlostí. [3]

$$\omega_1 = 2\pi \cdot f_1 \cdot \frac{1}{p} \quad (2)$$

Rotor se následně otáčí úhlovou rychlostí ve stejném smyslu. [3]

$$\omega = \omega_1 \cdot (1 - s) \quad (3)$$

V rotorovém vinutí se bude indukovat napětí o frekvenci. [3]

$$f_2 = s \cdot f_1 \quad (4)$$

Proudy protékající tyčemi rotoru, vytvoří magnetomotorické napětí rotoru. Můžeme si ho představit jako vektor F_{m2} , který se vůči rotoru otáčí úhlovou rychlostí. [3]

$$\omega_2 = s \cdot \omega_1 \quad (5)$$

Jelikož se rotor motoru otáčí v totožném smyslu úhlovou rychlostí ω , bude výsledná rychlost vektoru F_{m2} vůči statoru rovna. [3]

$$\omega_2 + \omega = \omega_1 \cdot (1 - s) + s \cdot \omega_1 = \omega_1 \quad (6)$$

Vektory magnetomotorického napětí statoru F_{m1} a rotoru F_{m2} , se otáčejí v totožném smyslu konstantní úhlovou rychlostí ω při jakémkoli skluzu. Jinak řečeno, statorové a rotorové pole se vzhledem k sobě nepohybují. To je ale fiktivní představa, protože v motoru je pouze výsledné pole dané tokem ϕ , to se skládá z pole statoru a rotoru. Kromě hlavního toku ϕ se v motoru vyskytuje rozptylový tok. [3]

Dá se tedy říci, že asynchronní motor může fungovat jen při rovnosti úhlových rychlostí magnetomotorických napětí F_{m1} a F_{m2} , tudíž stator a rotor musí mít stejný počet pólů. Výsledné magnetomotorické napětí se skládá ze součtu dvou magnetomotorických napětí. [3]

$$F_{m0} = F_{m1} + F_{m2} \quad (7)$$

Výsledné magnetomotorické napětí budí točivé magnetické pole motoru.

Magnetomotorická napětí byla uvažována jako prostorové vektory. Dají se také vyjádřit i jako časové vektory (fázory). Fázor magnetomotorického napětí F_{m1} a fázor proudu I_1 leží ve stejném směru (úhel je rovný nule). [3]

6 Energetická bilance

Motor připojený do sítě odebírá činný příkon. [4]

$$P_1 = m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi \quad (8)$$

kde m_1 počet fází na statoru

$\cos\varphi$ účinník asynchronního motoru

Ztráty vznikající ve vinutí statoru odebírají část příkonu.

$$\Delta P_{Cu1} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_1^2 \quad (9)$$

V železe statoru se v teplo přemění výkon, ten pak uvažujeme jako ztráty v železe. [4]

$$\Delta P_{Fe} = m_1 \cdot \frac{U_1^2}{R_{Fe}} \quad (10)$$

Výkon přenášený ze statoru do rotoru vzduchovou mezerou se rovná rozdílu výkonu odebraného ze sítě a všech ztrát ve statoru. [4]

$$P_\delta = P_1 - (\Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_d) \quad (11)$$

kde ΔP_d přídatné ztráty statoru

V obr. 8 jsou vyobrazena rozdělení výkonů při jmenovitém zatížení.

Tento výkon, který je přenášený na rotor, se dělí na dvě části. První je elektrický výkon P_{el} , který pokrývá ztráty ve vinutí rotoru, jež jsou dané hodnotami odporu a proudu rotoru. [4]

$$\Delta P_{Cu2} = m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 \quad (12)$$

kde m_2 počet fází rotoru

Druhá část je celkový mechanický výkon, konvertovaný z elektrické energie na mechanickou. [4]

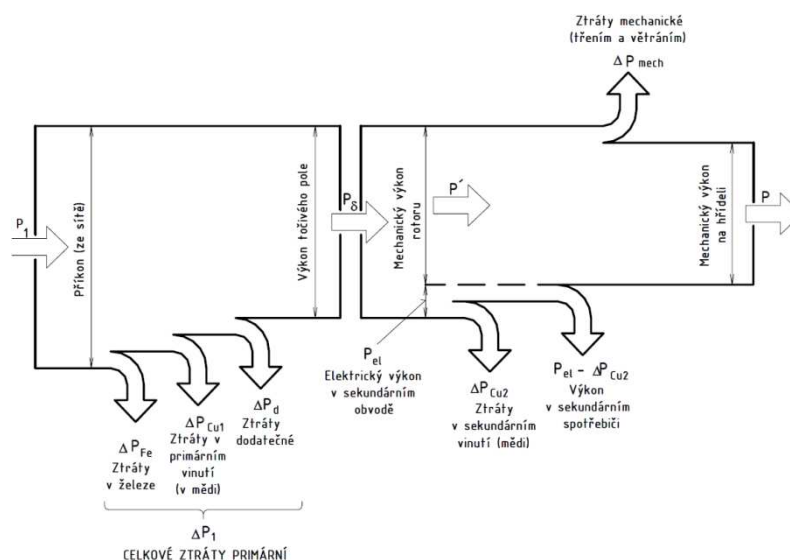
$$P' = (1 - s) \cdot P_\delta \quad (13)$$

Skutečný mechanický výkon P na hřídeli je menší než celkový mechanický výkon o mechanické ztráty motoru. [4]

$$P = P' - \Delta P_{mech} \quad (14)$$

Účinnost motoru je pak podíl skutečného mechanického výkonu k příkonu motoru. [4]

$$\eta = \frac{P}{P_1} \quad (15)$$

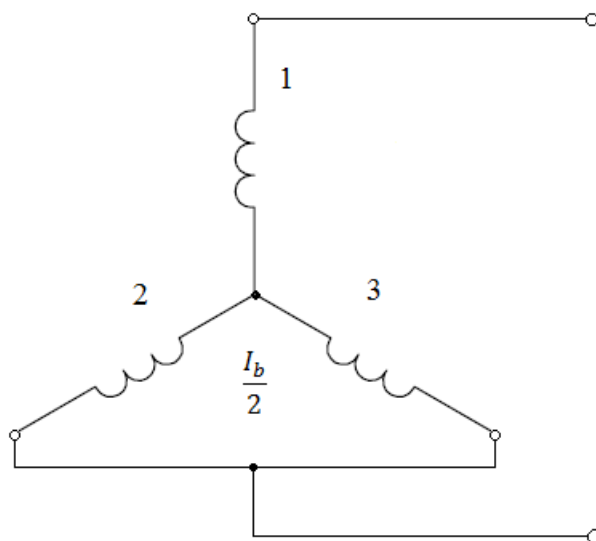


Obr. 8 Rozdělení výkonů asynchronního motoru [3]

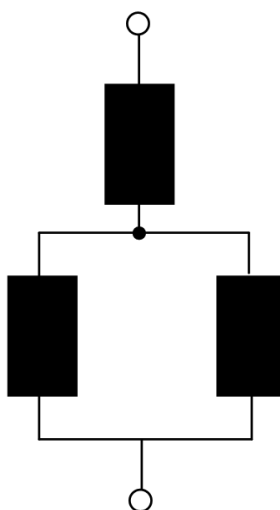
7 Synchronizace asynchronního motoru

Asynchronní motor, který má vinutý rotor vyvedený na kroužky, může být synchronizován stejnosměrným buzením rotoru. Motor se spouští jako klasický asynchronní motor a po rozběhnutí se na rotor připojí zdroj stejnosměrného proudu. Je-li budící proud dostatečně velký, vpadne motor do synchronizmu. Takto synchronizovaný motor má vlastnosti synchronního motoru. Pokud je motor vhodně nabuzený, neodebírá ze střídavé sítě magnetizační výkon, nýbrž pracuje s účinnkem blízkým jedničce. Jestliže je přebuzený, dodává do sítě jalový výkon a zlepšuje účinník. [5]

V obr. 9 je znázorněno zapojení rotorového vinutí kroužkového motoru, jehož dvě fáze jsou spojeny paralelně a takto zapojené vinutí rotoru je napájené stejnosměrným zdrojem proudu. Při chodu motoru v synchronizmu protéká jednou fází celý budící proud, zatímco zbylými dvěma protéká poloviční budící proud. [5]



Obr. 9 Zapojení rotorového vinutí



Obr. 10 Zapojení odporu rotorového vinutí

Odvození budicího proudu a napětí v rotoru pro stejné Joulovy ztráty:

$$R_C = R_f + \frac{R_f \cdot R_f}{R_f + R_f} = R_f + \frac{R_f^2}{2R_f} = \frac{3}{2} \cdot R_f = 1,5 \cdot R_f$$

$$3 \cdot R_f \cdot I_{1N}^2 = \frac{3}{2} \cdot R_f \cdot I_b^2$$

$$I_b^2 = \frac{3 \cdot 2 \cdot I_{1N}^2}{3}$$

$$I_b = \sqrt{2} \cdot I_{1N} = 1,41 \cdot I_{1N} \quad (16)$$

$$U_b = R_C \cdot I_b = 1,5 \cdot R_f \cdot 1,41 \cdot I_{1N} = 2,12 \cdot R_f \cdot I_{1N} \quad (17)$$

kde I_{2N} rotorový proud při chodu jako asynchronní motor

Tento proud vyvolává stejné magnetické napětí, jako proud v rotoru I_{2N} .

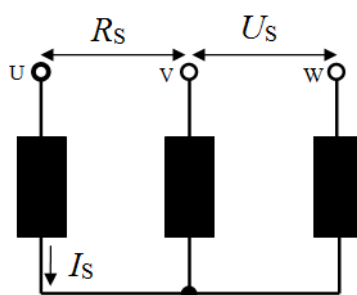
8 Měření odporu

Měření probíhalo na stroji, který byl v klidu a teplota okolí byla 20°C, tudíž hodnota odporu je měřena při teplotě 20°C. Po zahřátí vinutí na provozní teplotu což je 75°C se provede další měření. Z této hodnoty odporu pak vycházíme při výpočtu ztrát. Jelikož se jedná o motor s vinutou kotvou, tak zjišťujeme odpor statorového vinutí i rotorového vinutí. Postupuje se tak, že pomocí měřicího přístroje proměříme svorkovnici motoru a kroužky bez kartáčů.

Pokud neznáme vnitřní zapojení vinutí, tak pro výpočet ztrát ve vinutí stačí znát naměřený odpor R_S . Tyto ztráty jsou totiž stejné jak pro zapojení do hvězdy, tak i pro zapojení do trojúhelníku. [2]

$$\Delta P_{Cu} = 1,5 \cdot R_S \cdot I_S^2 \quad (18)$$

kde I_S sdružený proud měřený na přívodech ke svorkám



Obr. 11 odpory vinutí zapojené do hvězdy

Jestliže nemáme k dispozici hodnoty odporu při 75°C, lze využít vzorce pro přepočtení odporu při 20°C na 75°C pro měděné vinutí. [2]

$$R_{75} = R_{20} \cdot \frac{235+75}{235+20} \quad (19)$$

V Tab. 1 nalezneme naměřené hodnoty odporu vinutí statoru a vinutí rotoru

Tab. 1 Naměřené hodnoty odporu vinutí statoru a rotoru

Odpor statoru	R_s	Odpor rotoru	R_s
	(Ω)		(Ω)
20°C	5,5	20°C	2,13
75°C	6,23	75°C	2,58

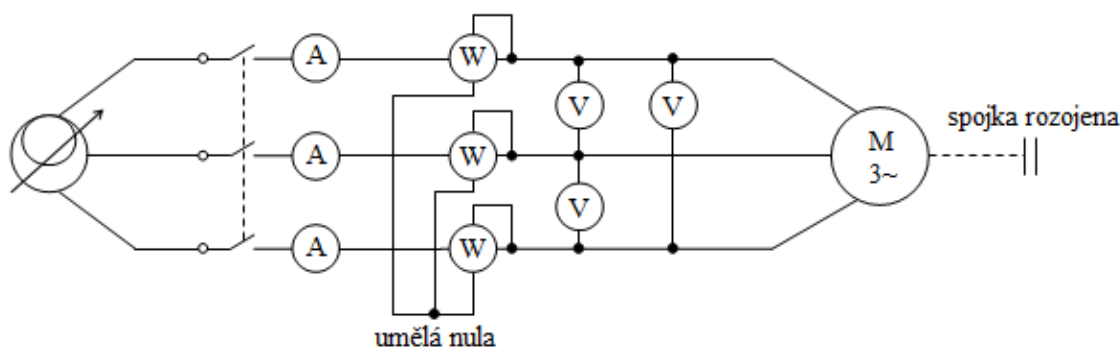
9 Měření v asynchronním chodu

Měření probíhalo ve školních laboratořích na motoru značky Siemens typu P112M06 a jeho štítkové hodnoty jsou $U_1 = 380 \text{ V}$, $U_2 = 90 \text{ V}$, $I_1 = 7,4 \text{ A}$, $I_2 = 15,5 \text{ A}$, $n_N = 905 \text{ min}^{-1}$ (obr. 1).

9.1 Měření naprázdno

Měření naprázdno slouží ke zjištění ztrát v železe ΔP_{Fe} a ztrát mechanických ΔP_{mech} . Dále také určujeme proud naprázdno I_0 a účinník naprázdno $\cos\varphi_0$ pro přiložené jmenovité napětí U_N .

Na obr. 12 je znázorněné schéma zapojení asynchronního motoru pro měření naprázdno.



obr. 12 Schéma měření asynchronního motoru naprázdno

Motor naprázdno je provozní stav, kdy statorové vinutí je připojeno ke jmenovitému napětí a hřídel motoru není zatížena žádným mechanickým momentem. Při měření se na regulačním zdroji nastaví hodnota $1,2U_N$ a následně postupně snižujeme napětí na $0,3U_N$. V měření pokračujeme tak dlouho, dokud s klesajícím napětím klesají i statorové proudy I_0 . V okamžiku, kdy začnou stoupat, měření ukončíme. Odečítáme proud naprázdno I_0 a příkon naprázdno P_0 pro každou hodnotu napětí. [2]

Pro lepší přehled v grafu je proud I_0 na poměrnou hodnotu i_0 .

Tab. 2 Výtažek změřených hodnot při měření naprázdno

U_0	I_0	i_0	P_0	ΔP_0	$\cos\varphi_0$
(V)	(A)	(-)	(W)	(W)	(-)
386,3	6,24	0,8434	513,3	191,98	0,1229
385	6,19	0,8374	506,8	190,02	0,1226
383,4	6,13	0,8284	497,1	187,09	0,1221
382,3	6,1	0,8239	492,3	185,68	0,1220
380,7	6,03	0,8150	480,4	180,33	0,1208
380	6	0,8119	473,2	175,45	0,1197
377,9	5,93	0,8014	462,1	172,02	0,1190
377,2	5,91	0,7989	458,8	170,49	0,1188
375,9	5,86	0,7914	451,3	168,31	0,1184
374,7	5,81	0,7861	446,9	167,82	0,1183

Příklad výpočtu jednotlivých veličin:

$$\cos\varphi_{0N} = \frac{P_{0N}}{\sqrt{3} \cdot U_{0N} \cdot I_{0N}} = \frac{473,2}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 6} = 0,1197 \quad (20)$$

$$\Delta P_0 = P_0 - \Delta P_j = 480,4 - 1,5 \cdot 5,5 \cdot 6^2 = 175,45 \text{ W} \quad (21)$$

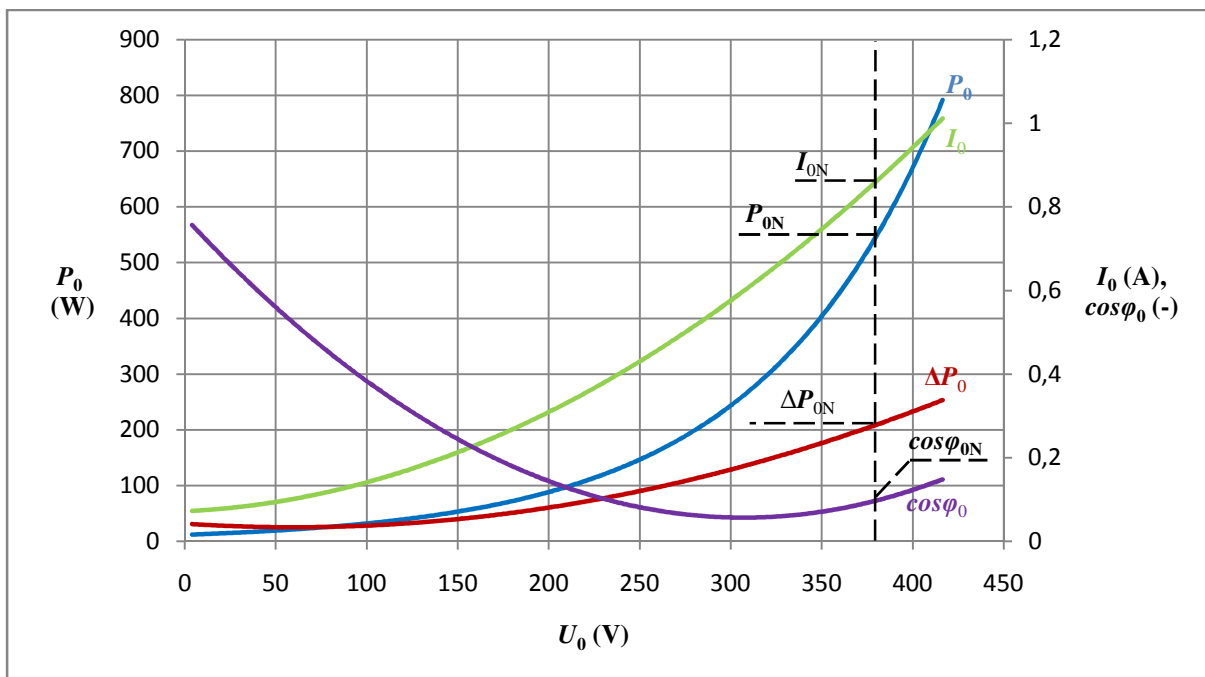
$$i_0 = \frac{I_0}{I_N} = \frac{6}{7,4} = 0,8119 \quad (22)$$

Na obr. 13 jsou vyneseny všechny důležité veličiny v závislosti na napětí. U vynesných průběhů veličin jsou vyznačeny pracovní body při jmenovitém napětí U_N .

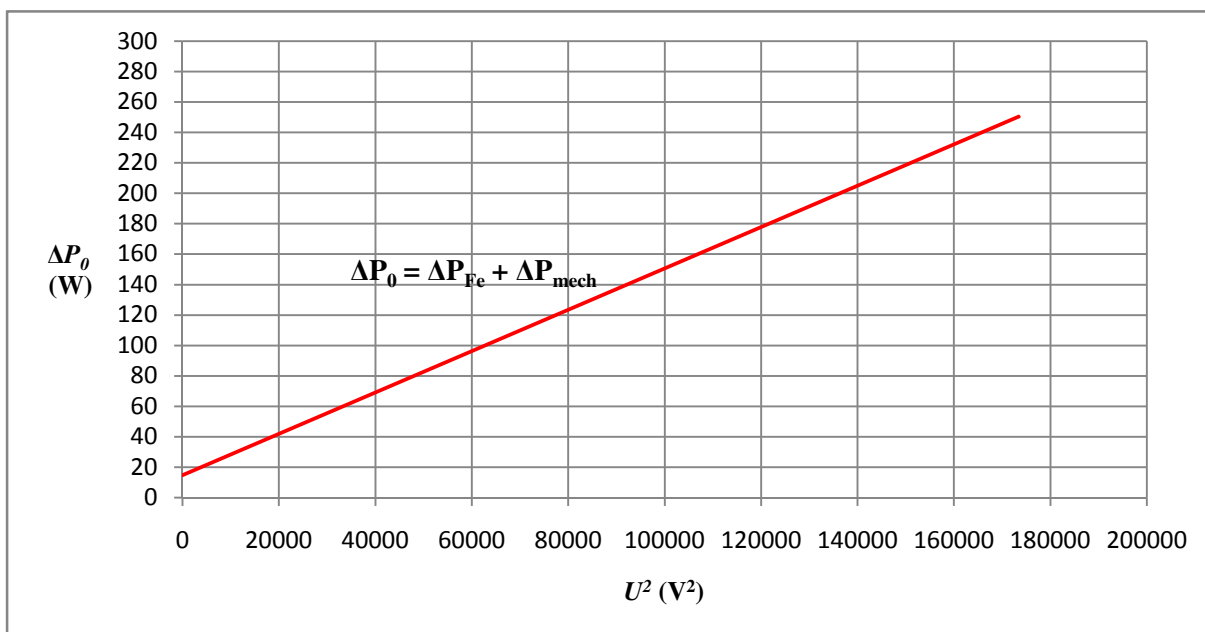
V tomto měření zjišťujeme ztráty naprázdno ΔP_0 . Ty určíme odečtením Jouleových ztrát ΔP_{Cu} (podle rovnice č. 18) od příkonu naprázdno P_0 . Potom tedy platí $\Delta P_0 = P_0 - \Delta P_{Cu}$. Dále je nutné určit ze ztrát naprázdno ΔP_0 ztráty v železe ΔP_{Fe} a ztráty mechanické ΔP_{mech} . Zde platí $\Delta P_0 = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech}$. Stanovení těchto složek je znázorněno na obr. 14. Vykreslenou křivku ΔP_0 prodloužíme extrapolací na svislou osu a tím určíme ztráty ΔP_m . Jak můžeme vidět, ztráty ΔP_0 nejsou lineární, a proto by byla extrapolace nepřesná. Je tedy vhodnější vynést ztráty ΔP_0 na kvadrátu napětí a tím se křivka linearizuje. [2]

Po odečtení mechanických ztrát z grafu je možné vypočítat ztráty v železe ΔP_{Fe} pomocí vztahu:

$$\begin{aligned} \Delta P_{mech} &= 20 \text{ W} \\ \Delta P_{Fe} &= \Delta P_0 - \Delta P_m = 175,45 - 20 = 155,45 \text{ W} \end{aligned} \quad (23)$$



Obr. 13 Charakteristika měření naprázdno

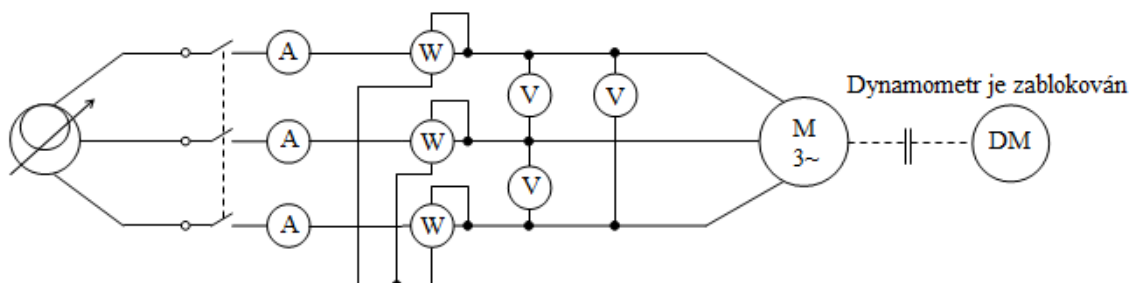


Obr. 14 Charakteristika ztrát naprázdno

9.2 Měření nakrátko

Při měření nakrátko zjišťujeme ztráty nakrátko (v mědi) ΔP_k , dále procentní napětí nakrátko $u_k\%$ a účinník nakrátko $\cos\varphi_k$.

Schéma zapojení asynchronního motoru ve stavu nakrátko je znázorněno na obr. 15.



Obr. 15 Schéma měření asynchronního motoru nakrátko

Stav nakrátko vzniká tehdy, když statorové vinutí připojíme k síti a rotor se neotáčí (je zabrzděn dynamometrem). Při tomto měření je třeba postupovat velmi rychle, protože vinutí se rychle zahřívá. Motor napájíme sníženým napětím a hodnotu proudu nastavujeme od 120 % I_N do 30 % I_N . Výsledné charakteristiky budou takřka lineární. [2]

Při této zkoušce je celý příkon odebíraný ze sítě spotřebován na krytí ztrát, které se ve stroji přeměňují na teplo.

Pro lepší přehled v grafu byl proud I_k přepočítán na poměrnou hodnotu proudu i_k , jak tomu bylo i u měření naprázdno.

Tab. 3 Výtažek hodnot z měření nakrátko

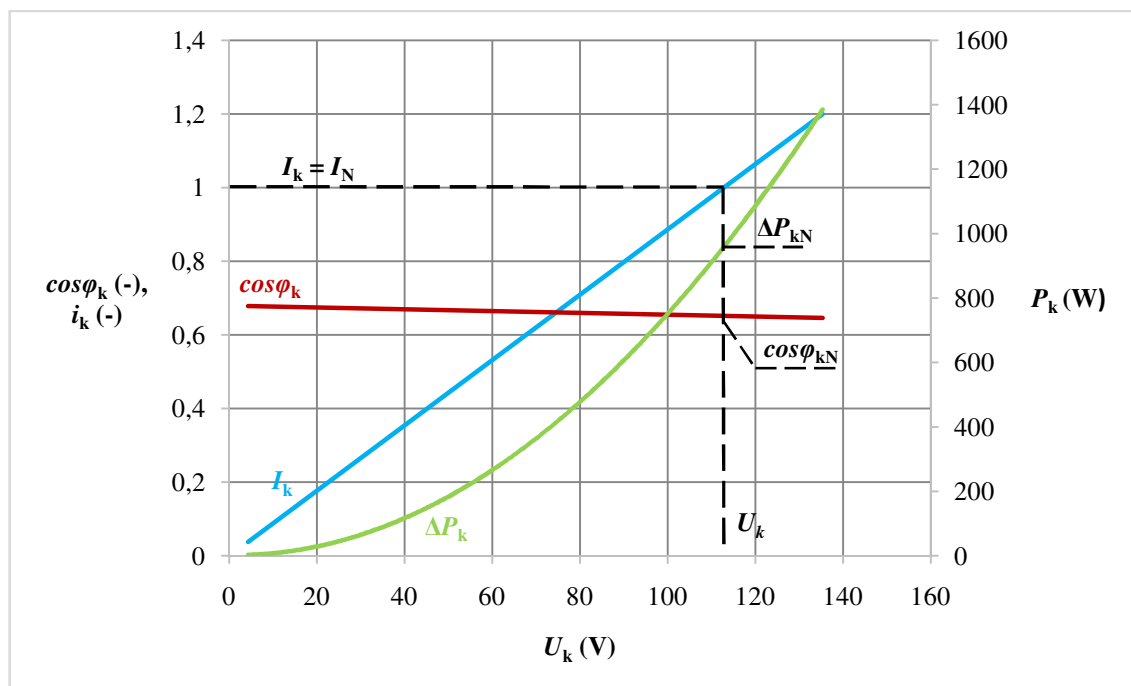
I_k	i_k	U_k	ΔP_k	$\cos\varphi_k$
(A)	(-)	(V)	(W)	(-)
7,40	1	111,8	936,5	0,6529
7,39	0,999	111,6	933,5	0,6532
7,37	0,996	111,2	926,3	0,6528
7,26	0,981	109,5	899,1	0,6526
7,1	0,959	107,2	859,7	0,6526
7,05	0,953	106,5	849,4	0,6530
7,01	0,947	105,8	838,5	0,6526
6,92	0,935	104,6	817,9	0,6526
6,77	0,915	102,3	783,5	0,6527
6,73	0,909	101,7	773,4	0,6528

Příklad výpočtu jednotlivých veličin:

$$\cos\varphi_k = \frac{P_k}{\sqrt{3} \cdot U_k \cdot I_k} = \frac{936,5}{\sqrt{3} \cdot 111,8 \cdot 7,4} = 0,652 \quad (24)$$

$$i_k = \frac{I_k}{I_N} = \frac{7,4}{7,4} = 1 \quad (25)$$

Na obr. 16 jsou znázorněny všechny důležité veličiny, které ve stavu nakrátko posuzujeme. U jednotlivých průběhů jsou vyznačeny pracovní body pro jmenovitý proud I_N .



Obr. 16 Charakteristika měření nakrátko

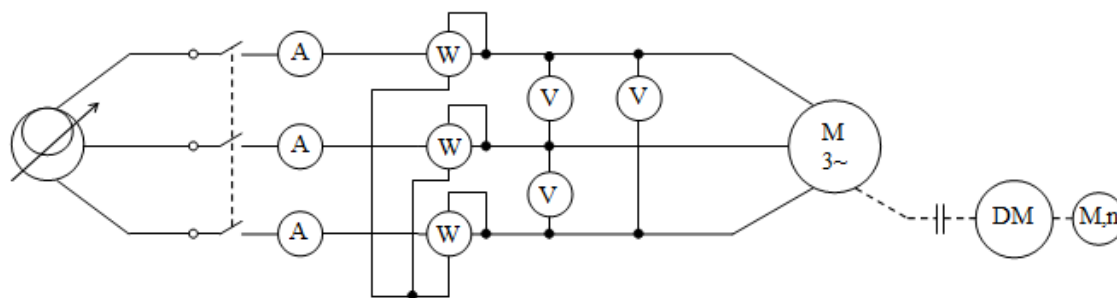
Dále je zapotřebí přepočítat proud I_k (je roven I_N) při sníženém napětí na skutečný proud I_{kN} , který by procházel vinutím motoru při plném jmenovitém napětí U_N . Potom tedy použijeme vzorec:

$$I_{kN} = I_k \cdot \frac{U_N}{U_k} = 7,41 \cdot \frac{380}{111,8} = 25,19 \text{ A} \quad (26)$$

9.3 Měření zatěžovací charakteristiky

Cílem měření zatěžovacích charakteristik je znázornění veličin (jako jsou příkon P_p , proud I , skluz s nebo otáčky n , účinnost η a účinník $\cos \varphi$) na mechanickém výkonu motoru P při konstantním napětí U_N .

Na obr. 17 je uvedeno schéma zapojení asynchronního motoru pro měření zatěžovacích charakteristik.



Obr. 17 Schéma měření zatěžovacích charakteristik asynchronního motoru

Připojíme-li statorové vinutí k třífázové síti a hřídel zatížíme mechanickým momentem, jedná se o provozní stav motoru při zatížení. Rotor se přitom zpožďuje za točivým polem statoru o skluz s . Měří se na motoru, který je napájen jmenovitým napětím U_N . Postupně motor zatěžujeme dynamometrem. Přetížení motoru volíme od 150 % P_N do chodu naprázdno. [2]

Tab. 4 Naměřené hodnoty zatěžovací charakteristiky

I	n	s	M	P_1	P	η	$\cos\varphi$
(A)	(min ⁻¹)	(%)	(Nm)	(W)	(W)	(-)	(-)
6,08	998	0,2	0	449	0	0	0,112
6,07	987	1,3	2,5	805	258	0,32	0,201
6,05	981	1,9	5	1028	514	0,5	0,258
6,13	975	2,5	7,5	1271	766	0,6	0,315
6,22	966	3,4	10	1556	1012	0,65	0,38
6,32	956	4,4	12,5	1807	1251	0,69	0,435
6,51	942	5,8	15,1	2209	1490	0,67	0,515
6,68	939	6,1	17,5	2389	1721	0,72	0,544
6,91	927	7,3	20	2696	1942	0,72	0,592
7,23	913	8,7	22,5	3027	2151	0,71	0,636
7,47	903	9,7	25	3274	2364	0,72	0,666
8,35	872	12,8	31	4002	2831	0,71	0,728

Příklad výpočtu jednotlivých veličin:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 = \frac{1000 - 927}{1000} \cdot 100 = 7,3 \%$$

$$P = M \cdot \Omega = M \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = 20 \cdot \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 927}{60} = 1942 \text{ W} \quad (27)$$

$$\eta = \frac{P}{P_1} = \frac{1942}{2696} = 0,72$$

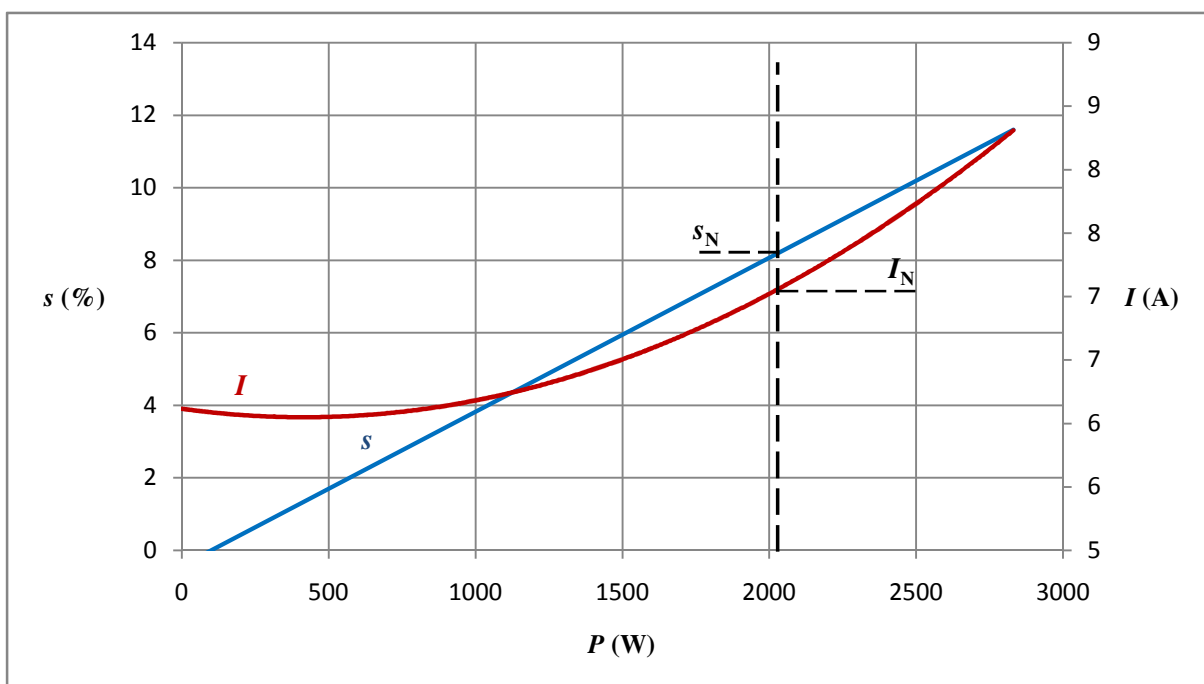
$$\cos\varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I} = \frac{2696}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 7,47} = 0,592$$

Z důvodu přehlednosti jsou charakteristiky rozděleny do dvou grafů. V obr. 18 je vykreslen proud I a skluz s v závislosti na mechanickém výkonu P . Na obr. 19 je znázorněn příkon P_1 , účinnost η , účinník $\cos\varphi$ v závislosti na mechanickém výkonu P . Pro všechny průběhy veličin jsou vyznačeny jejich pracovní body pro jmenovitý výkon P_N . Tyto hodnoty je vhodné srovnat se štítkovými hodnotami motoru. [2]

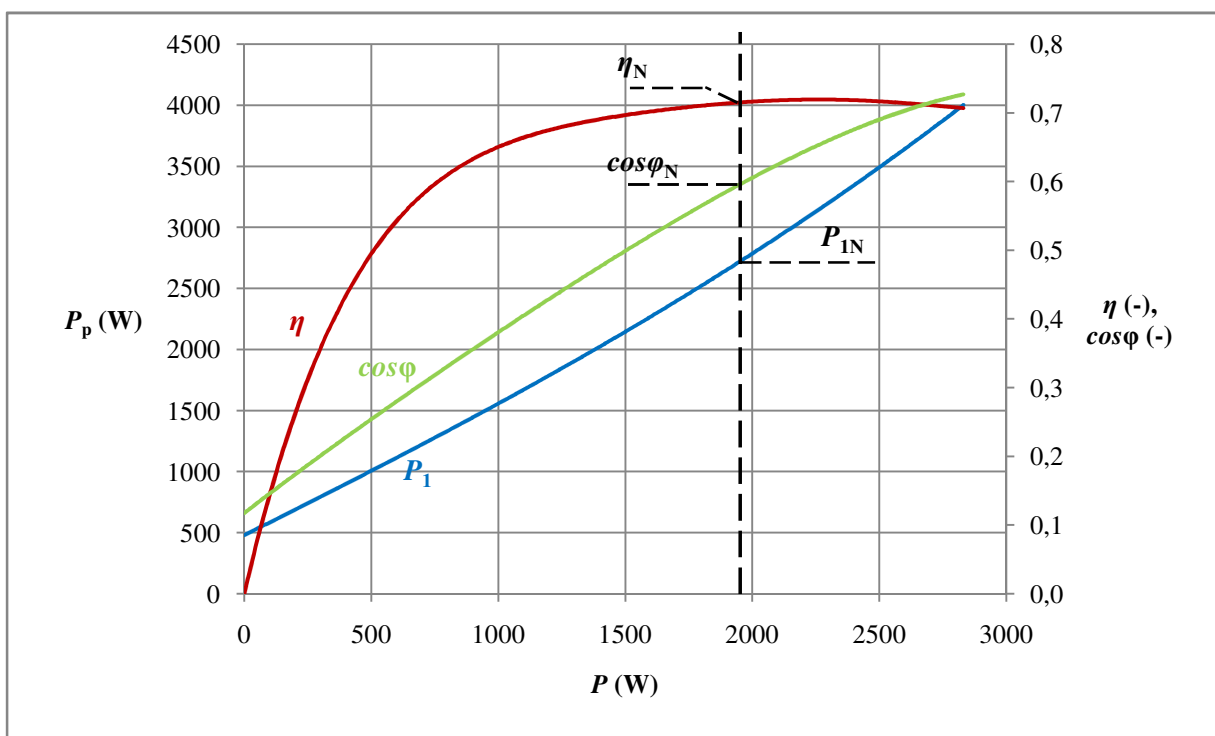
V tab. 5 je uvedeno srovnání jmenovitých hodnot veličin ze štítku asynchronního motoru a jmenovité hodnoty ze zatěžovací charakteristiky.

Tab. 5 Jmenovité hodnoty měřeného motoru

	I	U	n	P	$\cos\varphi$	M
	(A)	(V)	(-)	(W)	(-)	Nm
Štítkové hodnoty	7,4	380	905	2000	0,4106	21,1
Naměřené hodnoty	6,91	380	927	1942	0,592	20



Obr. 18 Závislost skluzu a proudu na mechanickém výkonu

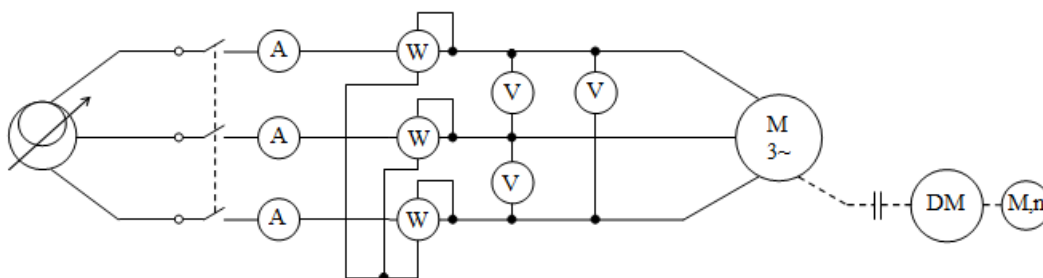


Obr. 19 Zatěžovací charakteristika

9.4 Měření momentové charakteristiky

U tohoto měření nás zajímá moment motoru M , který je vytvářený asynchronním motorem na hřídeli. Nejde ho vyjádřit ze štiťkových hodnot, protože se mění v závislosti na otáčkách motoru n , proto sestavujeme momentovou charakteristiku, což je závislost momentu motoru M na skluzu s (případně na otáčkách n). Z ní vyjadřujeme záběrný moment M_{zab} a maximální moment (moment zvratu) M_{max} . [2]

Schéma zapojení, které bylo použito pro měření momentové charakteristiky, je k vidění na obr. 20.



Obr. 20 Schéma zapojení asynchronního motoru

Měření se provádí sníženým napětím $U' = 0,5U_N$, které udržujeme konstantní. Omezí se tak nadměrné přehřívání motoru vlivem ztrát, a to by mohlo vést k poškození motoru. Měří se v celém rozsahu otáček. Pomocí dynamometru motor zatížíme takřka do stavu nakrátko a následně motor odlehčujeme. Z měřících přístrojů odcítáme otáčky n a moment motoru M . [2]

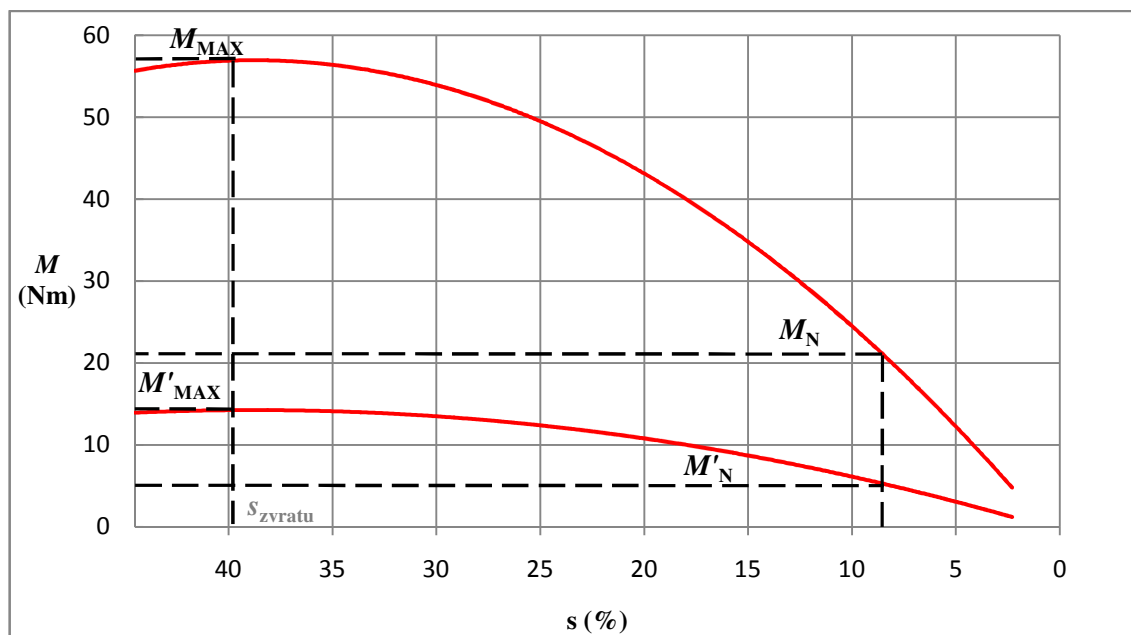
Jak už bylo řečeno, měření se provádí sníženým napětím U' , tudíž je nutné přepočíst moment motoru M' na moment M , který by motor vyvíjel při jmenovitém napětí U_N . Platí pro něj vztah: [2]

$$M = M' \cdot \left(\frac{U_N}{U'}\right)^2 = 1 \cdot \left(\frac{380}{190}\right)^2 = 4 \text{ Nm} \quad (28)$$

Tab. 6 Naměřené hodnoty momentové charakteristiky

U'	M'	n	M	s
(V)	(Nm)	(min ⁻¹)	(Nm)	(%)
190	1	977	4	2,3
190	1,5	970	6	3
190	2,8	953	11,2	4,7
190	3,3	947	13,2	5,3
190	3,5	946	14	5,4
190	4,7	928	18,8	7,2
190	6	905	24	9,5
190	9	846	36	15,4
190	10,1	813	40,4	18,7
190	13,5	689	54	31,1
190	14	555	56	44,5

V obr. 21 je vykreslena momentová charakteristika, ve které je vyznačen skluz zvratu s_{zvratu} , maximální moment M_{max} .



Obr. 21 Momentová charakteristika

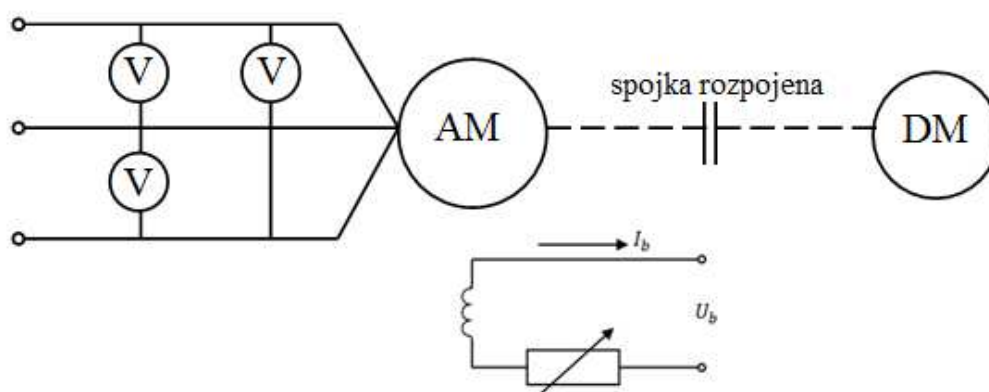
10 Měření v synchronizovaném chodu

Jak už bylo probráno v kap. 7, k tomu, abychom úspěšně synchronizovali asynchronní motor, je nutné napájet rotor přes kroužky zdrojem stejnosměrného proudu. Schéma zapojení rotorového vinutí je uvedeno na obr. 9. Velikost budícího proudu, nutného ke vpadnutí motoru do synchronizmu, lze spočítat pomocí vztahu (rovnice č. 16):

$$I_b = 1,41 \cdot I_{2N} = 1,41 \cdot 15,5 = 21,88 \text{ A}$$

10.1 Měření naprázdno

Předtím, než se začne měřit, musíme nejprve motor rozběhnout jako běžný asynchronní motor. Následně se začne budit stejnosměrným proudem. Ten je přiveden na kroužky rotoru. Proud se postupně zvyšuje do té doby, než motor vpadne do synchronizmu. Při měření charakteristiky naprázdno se motor otáčí synchronními otáčkami a nastavujeme budící proud od nuly do jistého maxima, u kterého je napětí na svorkách motoru zhruba $U_1 = 1,3U_{1N}$. Poté budící proud snižujeme až do nuly. Schéma toho zapojení je uvedeno na obr. 22. V grafickém znázornění vyjadřujeme závislost svorkového napětí U_1 na budícím proudem I_b . [4]

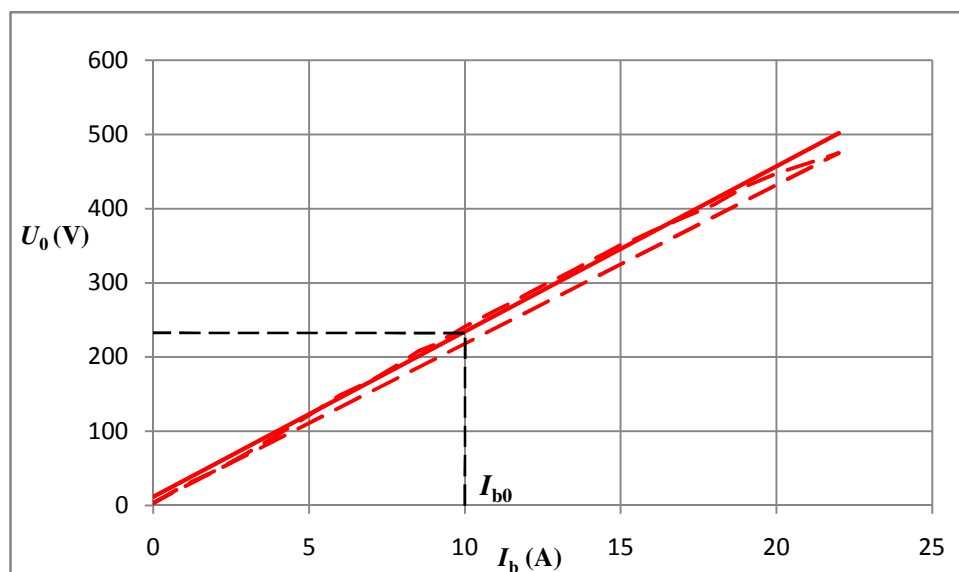


Obr. 22 Schéma zapojení měření naprázdno v synchronním chodu

Tab. 7 Výtažek hodnot měření naprázdno

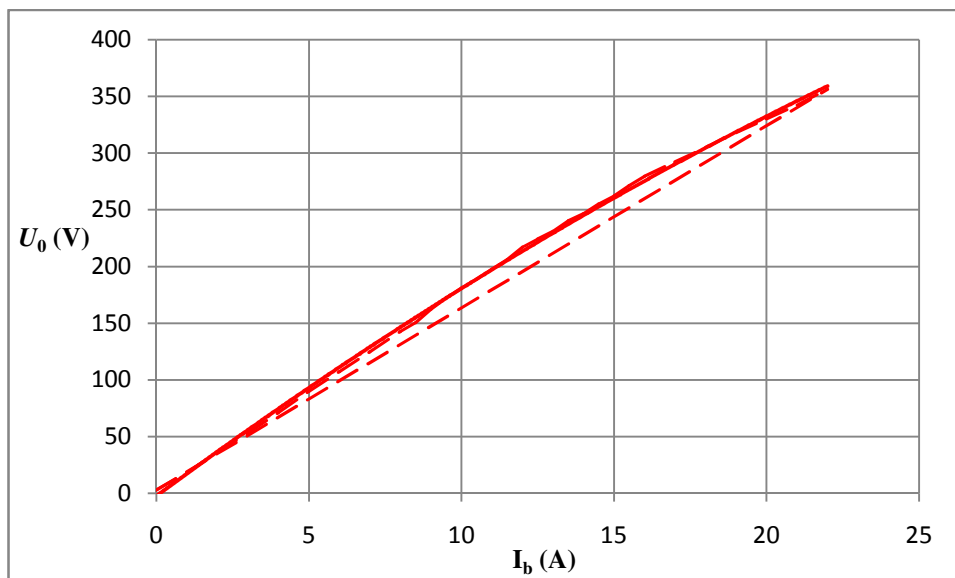
U_0	(V)	190,0	196,3	202,7	207,3	213,3	223,7	234,0	248,3	258,3	274,2
I_b	(A)	14	14,5	15	15,5	16	17	18	19	20	22

V obr. 23 je vyznačen budicí proud I_{b0} , který vybudí jmenovité napětí naprázdno. Jeho hodnota po odečtení z grafu činí $I_{b0} = 10$ A.



Obr. 23 Charakteristika naprázdno synchronního chodu

Dále se motor změřil i jako generátor, v tomto případě je na motor připojen dynamometr, který otáčí rotorem motoru ($n = 750 \text{ min}^{-1}$). Zdrojem stejnosměrného proudu opět regulujeme budicí proud I_b od nuly do určitého maxima a otáčky udržujeme konstantní. Na svorkách statoru odečítáme napětí pro jednotlivé hodnoty budícího proudu.

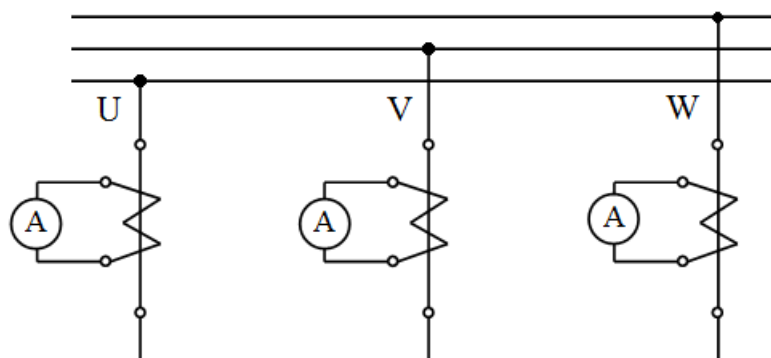


Obr. 24 Charakteristika naprázdno generátoru

10.2 Měření nakrátko

Postup před začátkem měření je obdobný jako u měření naprázdno (předchozí kapitola).

Charakteristika nakrátko je stav, při kterém jsou všechny tři svorky spojeny do zkratu (souměrný zkrat). Je to závislost satorového proudu I_1 na budícím proudu I_b a rotor motoru se otáčí synchronními otáčkami. V měření odečítáme proudy I_1 pro všechny fáze statoru a budící proud I_b . Pro omezení vlivu teploty vinutí, se měření provádí v co nejkratší době a měřit začínáme od největší hodnoty satorového proudu $I_1 = I_{1k} = 1,2I_{1N}$. [4]



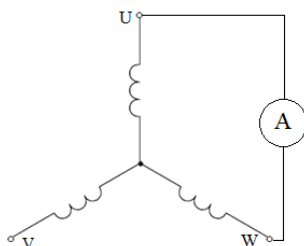
Obr. 25 Schéma zapojení pro měření souměrného zkratu pomocí měřících transformátorů

V tab. 8 jsou uvedené hodnoty pro souměrný zkrat.

Tab. 8 Hodnoty pro souměrný zkrat

I_k	(A)	1,95	2,55	3,35
I_b	(A)	10	15	20

Toto měření bylo ještě rozšířeno o měření nesouměrného zkratu. Ten nastane, pokud se zkratují dvě fáze (dvoupólový). Způsob vytvoření dvou fázového zkratu je uveden na obr. 26.



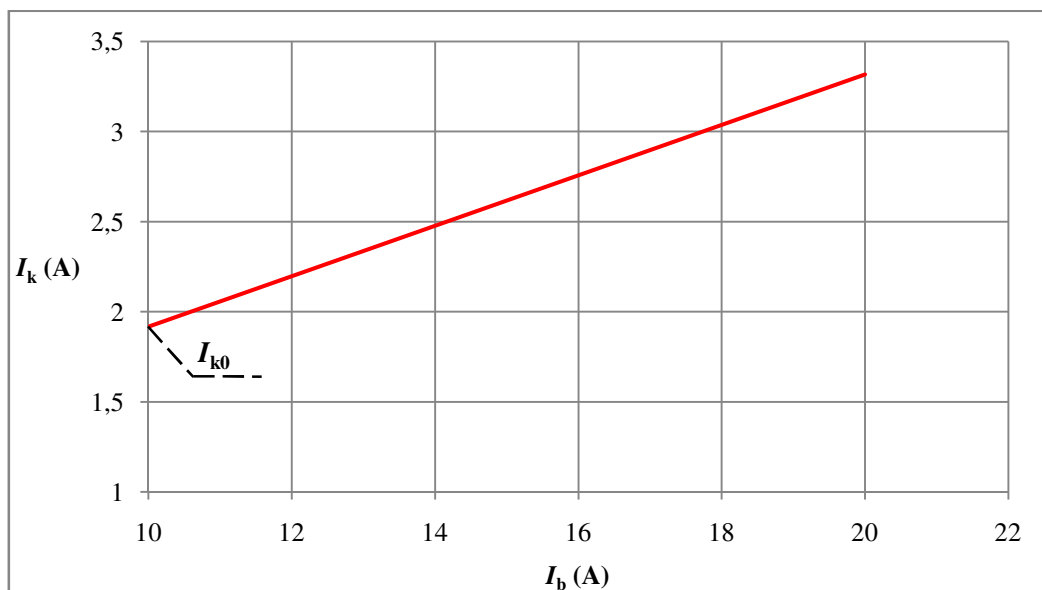
Obr. 26 Zapojení dvoupólového zkratu

Hodnoty z měření dvou fázového zkratu jsou k vidění v tab. 9.

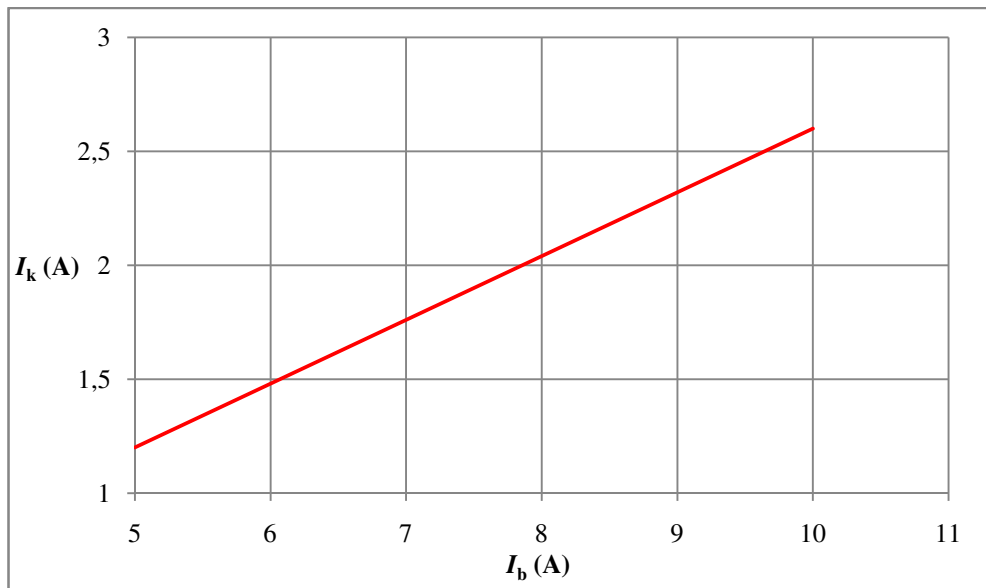
Tab. 9 Hodnoty nesouměrného zkratu

I_k	(A)	1,2	2,6
I_b	(A)	5	10

Z grafu nakrátko (obr. 27) je vyznačen zkratový proud I_{k0} pro budící proud I_{b0} . Jeho hodnota po odečtení je $I_{k0} = 1,91$ A.



Obr. 27 Charakteristika měření nakrátko pro souměrný zkrat



Obr. 28 Charakteristika měření nakrátko pro dvoupólový zkrat

Z hodnot odečtených z grafu naprázdno (obr. 23) a nakrátko (obr. 27) lze spočítat tyto parametry synchronizovaného motoru: [4]

- zkratový poměr

$$v_k = \frac{I_{k0}}{I_N} = \frac{1,91}{7,4} = 0,26 \quad (29)$$

- redukční činitel

$$g = \frac{I_{b0}}{I_{k0}} = \frac{10}{1,91} = 5,24 \quad (30)$$

- synchronní reaktance

$$X_d = \frac{U_{Nf}}{I_{k0}} = \frac{230}{1,91} = 120,12 \, \Omega \quad (31)$$

- jmenovitá impedance

$$Z_N = \frac{U_{Nf}}{I_{aN}} = \frac{230}{7,4} = 31,08 \, \Omega \quad (32)$$

10.3 Měření V - křivek

Buzením lze měnit dodávku nebo odběr jalového výkonu. Podbuzený stroj (motor nebo generátor) si bere ze sítě jalový výkon a přebuzený stroj naopak do sítě dodává jalový výkon.

Měření začíná připojením stroje do sítě, poté nastavíme pomocí dynamometru požadovaný výkon, který si ověříme na Wattmetrech. Změnu výkonu provádíme regulací rychlosti rotoru. Následně odčítáme proud v kotvě při daném budícím proudu, který postupně zvyšujeme (měření pravé větve křivky). Po každé změně hodnoty se doreguluje výkon na požadovanou hodnotu. Po dokončení se vrátíme k hodnotě budícího proudu I_b , při kterém byl stroj přifázován a jeho hodnotu snižujeme (měření levé větve křivky). [4]

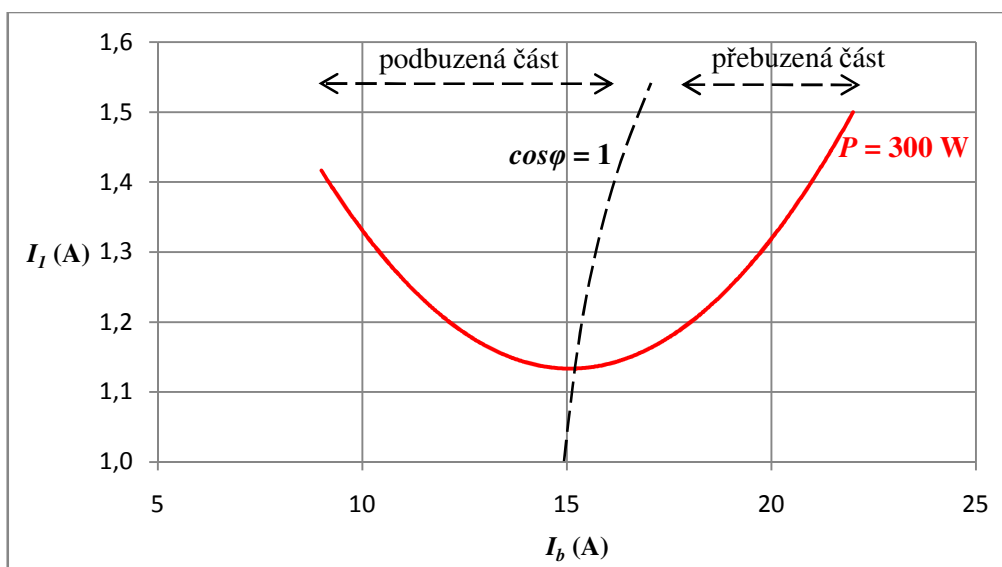
Tab. 10 Naměřené hodnoty pro motor

I_b	(A)	2,5	15,5	20	6	14	22	10	13	22
I_l	(A)	2,05	0	1	1,83	0,8	1,53	1,53	1,27	1,78
P	(W)	0	0	0	100	100	100	150	150	150

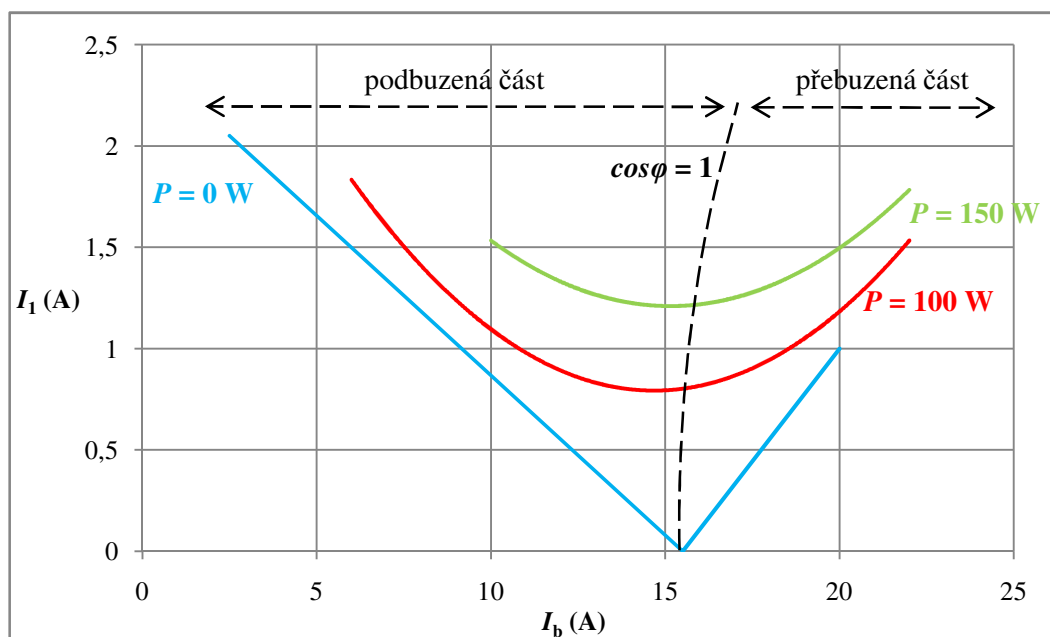
Tab. 11 Naměřené hodnoty pro generátor

I_b	(A)	9	15	22
I_l	(A)	1,42	1,13	1,5
P	(W)	300	300	300

V- křivky synchronního stroje jsou závislostí proudu kotvy I_l na budícím proudu I_b a jsou graficky vyhodnoceny na obr. 29 a obr. 30.



Obr. 29 V - křivky generátoru



Obr. 30 V - křivky motoru

11 Výpočet náhradního schématu

Velký vliv na rozbor práce asynchronního motoru má náhradní schéma, jehož pomocí lze názorně určit závislosti mezi veličinami, které charakterizují jednotlivé stavy motoru.

Náhradní schéma asynchronního motoru je vyobrazeno na obr. 31.

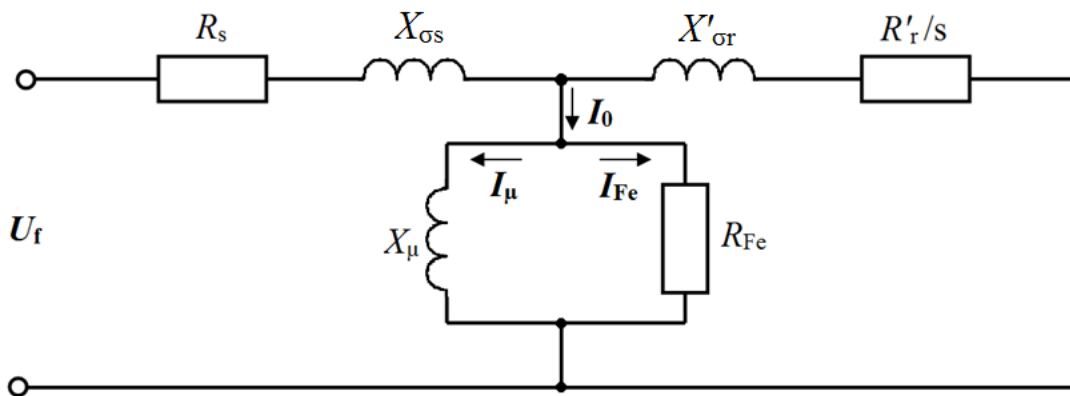
Jednotlivé prvky určíme z měření naprázdno při jmenovitém napětí a dále z měření nakrátko přepočítaného na jmenovité napětí. Z fázových hodnot měření naprázdno, pokud zanedbáme odpor a rozptylovou reaktanci statoru, vypočteme magnetizační reaktanci X_μ a odpor R_{Fe} , který v tomto případě udává ztráty v železe i ztráty mechanické. [4]

$$X_\mu = \frac{U_N}{I_\mu} \quad (33)$$

$$R_{Fe} = \frac{U_N}{I_{Fe}} \quad (34)$$

$$I_\mu = I_{0N} \cdot \sin \varphi_{0N} \quad (35)$$

$$I_{Fe} = I_{0N} \cdot \cos \varphi_{0N} \quad (36)$$



Obr. 31 Náhradní schéma asynchronního motoru

Z hodnot měření nakrátko, kdy je $s = 1$, vypočteme celkový činný odpor R_k při zanedbání magnetizační reaktance. Dále hodnotu odporu R_s máme určenu z měření odporu motoru, jak bude ukázáno v nadcházející kapitole, tudíž můžeme vypočítat odpor rotoru R'_r přepočítaný na stator. [4]

$$R_k = \frac{U_N \cdot \cos \varphi_k}{I_{kN}} \quad (37)$$

$$R'_r = R_k - R_s \quad (38)$$

Celkovou rozptylovou reaktanci X_σ určíme z měření nakrátko. Je součtem rozptylové reaktance statoru $X_{\sigma s}$ a rozptylové reaktance rotoru $X'_{\sigma r}$ přepočítané na stator. [4]

$$X_\sigma = X_{\sigma s} + X'_{\sigma r} = \sqrt{\left(\frac{U_N}{I_{kN}}\right)^2 - R_k^2} \quad (39)$$

Rozptylové reaktance $X_{\sigma s}$ a $X'_{\sigma r}$ lze rozdělit jen odhadem, nejčastěji na dva stejné díly.

Postup výpočtu je následující:

$$I_\mu = I_{0N} \cdot \sin \varphi_{0N} = 6 \cdot 0,9927 = 5,96 \text{ A}$$

$$I_{Fe} = I_{0N} \cdot \cos \varphi_{0N} = 6 \cdot 0,1197 = 0,72 \text{ A}$$

$$X_\mu = \frac{U_N}{I_\mu} = \frac{220}{5,96} = 36,91 \, \Omega$$

$$R_{Fe} = \frac{U_N}{I_{Fe}} = \frac{220}{0,72} = 305,56 \, \Omega$$

$$I_{kN} = I_k \cdot \frac{U_N}{U_k} = 7,4 \cdot \frac{220}{111,8} = 14,56 \text{ A}$$

$$R_k = \frac{U_N \cdot \cos \varphi_k}{I_{kN}} = \frac{220 \cdot 0,6529}{14,56} = 9,87 \, \Omega$$

$$R'_r = R_k - R_s = 9,87 - 2,75 = 7,12 \, \Omega$$

$$X_\sigma = X_{\sigma s} + X'_{\sigma r} = \sqrt{\left(\frac{U_N}{I_{kN}}\right)^2 - R_k^2} = \sqrt{\left(\frac{220}{14,56}\right)^2 - 9,87^2} = 11,44 \, \Omega$$

$$X_{\sigma s} = 5,72 \, \Omega, \quad X'_{\sigma r} = 5,72 \, \Omega$$

12 Vyhodnocení měření

12.1 Měření asynchronního motoru

Před zkouškami asynchronního motoru se provedlo měření odporu vinutí při okolní teplotě 20°C, kdy motor je v klidu a není připojen k síti (nedochází k průchodu proudu vinutím a k jeho následnému zahřátí). K výpočtu ztrát ve vinutí je zapotřebí odpor měřený při 75°C, tudíž byl motor připojen na síť a pracoval v chodu naprázdno. Po zahřátí na provozní teplotu bylo provedeno měření. Jelikož měřený motor má kroužkový rotor, provedlo se jak měření statorového odporu vinutí tak i rotorového odporu vinutí. Výsledné hodnoty jednotlivých odporů jsou k vidění v tab. 1.

Po měření odporu vinutí se provedla zkouška naprázdno, její charakteristika je graficky znázorněna v obr. 13. V něm můžeme vidět, že účinník vzrůstá se snižujícím se napětím. Proud naprázdno má podobný tvar jako křivka nasycení. Ztráty v železe jsou závislé na čtverci, proto je křivka ztrát naprázdno lineární (obr. 14). Odečtením hodnot při jmenovitém napětí získáme výsledné veličiny, které jsou uvedeny v tab. 12.

Tab. 12 Jmenovité hodnoty měření naprázdno

I_{0N}	P_{0N}	$\cos\varphi_{0N}$	ΔP_{FeN}	ΔP_{mech}
(A)	(W)	-	(W)	(W)
6	473,2	0,1197	155,45	20

V měření nakrátko zjišťujeme proud nakrátko při jmenovitém napětí, ztráty nakrátko při jmenovitém proudu a účinník nakrátko. Na vynesené charakteristice nakrátko (obr. 16) můžeme vidět, že účinník téměř nezávisí na napětí. Proud nakrátko vzrůstá lineárně s navyšujícím se napětím. Jeho hodnota při jmenovitém napětí je téměř $3,5I_N$. Výsledky měření jsou vypsány v tab. 13.

Tab. 13 Jmenovité hodnoty nakrátko

I_{kN}	ΔP_{kN}	$\cos\varphi_k$
(A)	(W)	-
25,19	936,5	0,6529

Zatěžovací zkouška vyjadřuje závislost různých veličin na mechanickém výkonu. Její charakteristika je rozdělena do dvou grafických vyhodnocení (obr. 18, obr. 19). Lze na nich vidět, že skluz lineárně stoupá při zvyšujícím se výkonu, jelikož rotor se zpožďuje za točivým polem statoru při narůstajícím zatížení. Účinnost zpočátku strmě stoupá, ale v polovině jmenovitého výkonu je nárůst rapidně snížen. V hodnotě jmenovitého výkonu dosahuje motor téměř své maximální účinnosti. Proud exponenciálně vzrůstá se zvyšujícím se výkonem. Příkon a účinník lineárně stoupají s výkonem motoru. Štítkové a naměřené hodnoty jsou pro porovnání uvedené v tab. 5.

Z měření momentové charakteristiky zjišťujeme moment zvratu, jmenovitý moment, skluz zvratu a jmenovitý skluz. V obr. 21 jsou vyznačeny tyto požadované veličiny. Charakteristika není změřena do konce, protože oteplení vinutí by mohlo nabrat takové velikosti, že by mohlo dojít k poškození vinutí. Proto v charakteristice není uveden záběrný moment.

12.2 Měření synchronizovaného asynchronního motoru

V měření naprázdno se provedly dvě charakteristiky. První je pro motor, který se otáčí synchronními otáčkami. Na této charakteristice můžeme vidět, že napětí naprázdno konstantně stoupá, při zvyšujícím se budícím proudu. Dále je v charakteristice vyznačen budící proud, který vybudí jmenovité napětí naprázdno. Druhá charakteristika je pro generátor, kdy rotorem otáčí dynamometr konstantními otáčkami ($n = 750 \text{ min}^{-1}$). Zde rovněž napětí naprázdno konstantně vzrůstá s budícím proudem.

U měření nakrátko se zjišťuje zkratový proud při souměrném zkratu a dvoupólovém zkratu (nesouměrný). U souměrného zkratu je v grafu (obr. 27) vyznačen zkratový proud pro velikost budícího proudu. Tyto hodnoty proudů jsou nutné pro výpočet parametrů synchronního stroje. Jejich výsledky jsou uvedeny v tab. 14.

Tab. 14 Parametry synchronního stroje

v_k	g	X_d	Z_N
-	-	Ω	Ω
0,26	5,24	120,12	31,08

Synchronní reaktance X_d určuje, jestli je daný synchronní generátor "měkkým" zdrojem elektrické energie. Protože při zatížení synchronního stroje vzniká průchodem proudu přes synchronní reaktanci úbytek napětí, snižuje napětí kotvy, tudíž čím větší je synchronní reaktance, tím "měkkší". Zkratový poměr v_k udává poměrnou velikost magnetizačního proudu.

V - křivky synchronního stroje udávají závislost proudu kotvy na budícím proud. Na obr. 30 jsou graficky vyhodnoceny V - křivky motoru. V podbuzené části motor spotřebovává jalový výkon (motor pracuje jako kompenzátor účinníku) a za hranicí 15 A budícího proudu začíná přebuzená část, kde motor naopak jalový výkon do sítě dodává. U generátoru byla změřena pouze jedna křivka (obr. 29) a také u něj platí to co pro motor, když se nachází v podbuzené nebo přebuzené části.

12.3 Náhradní schéma asynchronního motoru

Pomocí výpočtu náhradního schématu zjišťujeme parametry asynchronního motoru. Výsledné velikosti těchto parametrů jsou k nalezení v tab. 15. Odpor R_s a R'_r se mění s teplotou jejich vinutí. Rozptylové reaktance $X_{\sigma s}$ a $X'_{\sigma r}$ jsou závislé na proudu statoru a rotoru. Pokud daný proud začne vzrůstat, stoupne sycení cest, přes které se uzavírají rozptylové toky a to má za následek změnu rozptylových reaktancí.

Tab. 15 Parametry náhradního schématu

X_μ	R_{Fe}	R_s	R'_r	$X_{\sigma s}$	$X'_{\sigma r}$
(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)
36,91	305,56	2,75	7,12	5,72	5,72

13 Závěr

Asynchronní motor, jak už bylo zmíněno v kap. 2, má široké využití v praxi (např. jako pohon pro výtahy, kompresory, obráběcí stroje). Tím, že se asynchronní motor synchronizuje získává vlastnosti synchronního stroje, tudíž dojde k rozšíření jeho užití v praxi. Například automatizované systémy řízení, kde je zapotřebí zachování přesného poměru mezi kmitočtem sítě a otáčkami stroje. Dále také v oblasti výroby elektrické energie jako alternátor. Na obr. 24 lze vidět téměř lineární závislost napětí na budícím proudu, to znamená dobré regulační vlastnosti. Při větší synchronní reaktanci je zdroj "měkčí", tudíž je lepší ho použít tam, kde jsou vyžadovány menší nároky na tvrdost zdroje. Díky tomu, že v podbuzené části ze sítě odebírá jalový výkon, se může použít i jako synchronní kompenzátor, který zlepšuje účinnost sítě. Oproti klasickému synchronnímu motoru, synchronizovaný asynchronní motor má větší záběrný moment.

Co se synchronizace týče, je více možných způsobů zapojení vinutí rotoru. Doporučil bych sériové zapojení rotorového vinutí. Na rozdíl od paralelního zapojení, nedochází k nerovnoměrnému namáhání budícího vinutí. Dále je dobré zvolit správné měřicí zařízení. Například vhodný dynamometr, pomocí něhož můžeme přesně a rychle naměřit zkoušku nakrátko a momentovou charakteristiku. Kdyby měření probíhalo příliš dlouho a nastavování dynamometru bylo obtížné, mohlo by oteplení motoru ovlivnit výsledky měření.

Závěrem bych chtěl říci, že synchronizovaný asynchronní motor pojí dobré vlastnosti asynchronního stroje (jednoduchost, výborné použití v praxi, velký záběrný moment) a synchronního stroje (synchronní otáčky, podbuzený se chová jako kompenzátor)

Použitá literatura

- [1] CHMELÍK, Karel. *Asynchronní a synchronní elektrické stroje*. 1. vyd. Ostrava: VŠB Technická univerzita, 2001. ISBN 80-7078-857-7.
- [2] SOBOTA, Pavel, RUSNOK, Stanislav. *Cvičení z elektrických strojů*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2013. ISBN 978-80-248-3288-3.
- [3] PETROV, Georgij Nikolajevič. *Elektrické stroje 2*. 1. vyd. Praha: Československá akademie věd, 1982. ISBN 509-21-857.
- [4] HRABOVCOVÁ, Valéria. *Merenie a modelovanie elektrických strojov*. 2. vyd. Žilina: EDIS, 2009. ISBN 978-80-8070-924-2.
- [5] POLIAK, František. *Elektrické pohony*. 1. vyd. Bratislava: Slovenské vydateľství technické literatury, 1957. DT: 582 10.